

УДК 621.771.63

Ю.А. ПЛЕСНЕЦОВ, Е.Н. ХРИСТИЧЕНКО, А.Н. ХРИСТИЧЕНКО**АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРОФИЛЕЙ
С ПЕРИОДИЧЕСКИ ПОВТОРЯЮЩИМИСЯ ГОФРАМИ**

Выполнены исследования процесса валковой формовки профилей с периодически повторяющимися гофрами (высокой жесткости). Получены результаты, адекватно отражающие качественную сторону процесса формовки продольных периодических гофров, вместе с тем, заданные граничные условия требуют дальнейшего уточнения. Для отработки модели формообразования продольных периодических гофров и оценки ее достоверности необходимы экспериментальные исследования характера распределения поверхностных деформаций в очаге деформации. Для более точного анализа процесса формообразования профилей с периодически повторяющимися гофрами применен метод конечных элементов. Расчеты поверхности очага деформации, показали, что длина очага, соответствующая минимуму суммарной работы деформации, равна 110 мм при высоте гофра 36 мм. Получено хорошее совпадение объемов всех конечных элементов. Расхождения не превышали 5%. Рассчитаны поверхности очага деформации для двух задач с различными граничными условиями. При нахождении работы деформирования принята упругопластическая модель с упрочнением по линейному закону. При решении задачи, варьировались граничные условия в осевой плоскости валков и длина очага деформации. Получены зависимости для определения параметров очага деформации, усилий на валках, крутящих моментов и др.

Ключевые слова: профили с периодически повторяющимися гофрами, формовка в валках, метод конечных элементов, очаг деформации, усилия на валках, крутящие моменты.

Виконані дослідження процесу валкового формування профілів з періодично повторюваними гофрами (високої жорсткості). Отримані результати, які адекватно відображають якісну сторону процесу формування поздовжніх періодичних гофрів, разом з тим, задані граничні умови вимагають подальшого уточнення. Для відпрацювання моделі формоутворення поздовжніх періодичних гофрів і оцінки її достовірності необхідні експериментальні дослідження характеру розподілу поверхневих деформацій в осередку деформації. Для більш точного аналізу процесу формоутворення профілів з періодично повторюваними гофрами застосований метод скінчених елементів. Розрахунки поверхні осередку деформації, показали, що довжина осередку, відповідна мінімуму сумарної роботи деформації, дорівнює 110 мм при висоті гофра 36 мм. Отримано гарний збіг обсягів усіх скінчених елементів. Розбіжності не перевищували 5%. Розраховані поверхні осередку деформації для двох задач з різними граничними умовами. При знаходженні роботи деформування прийнята пружно-пластична модель зі зміцненням за лінійним законом. При вирішенні задачі, варіювалися граничні умови в осевій площині валків і довжина осередку деформації. Отримано залежності для визначення параметрів осередку деформації, зусиль на валках, обертових моментів і ін.

Ключові слова: профілі з періодично повторюваними гофрами, формування в валках, метод скінчених елементів, осередок деформації, зусилля на валках, обертові моменти.

The process of roll forming of profiles with periodically repeating corrugations (high rigidity) is performed. The results that adequately reflect the qualitative aspect of the shaping process of longitudinal periodic corrugations are obtained, at the same time, the specified boundary conditions require further refinement. To test the model for forming longitudinal periodic corrugations and to evaluate its reliability, experimental studies of the nature of the distribution of surface deformations in the deformation zone are necessary. For a more accurate analysis of the process of shaping profiles with periodically repeating corrugations, the finite element method is applied. Calculations of the surface of the deformation center showed that the length of the focus corresponding to a minimum of the total deformation work is 110 mm with a corrugation height of 36 mm. A good coincidence of the volumes of all finite elements is obtained. Divergences did not exceed 5%. The surfaces of the deformation center are calculated for two problems with different boundary conditions. When the deformation work is done, an elastic-plastic model is adopted with linear-law hardening. When solving the problem, the boundary conditions in the axial plane of the rolls and the length of the deformation center varied. Dependences are obtained for determining the parameters of the deformation center, the forces on the rolls, the torque moments, and so on.

Keywords: profiles with periodically repeating corrugations, forming in rolls, finite element method, deformation center, roll forces, torques.

Введение. Исследованиям процесса валковой формовки профилей с периодически повторяющимися гофрами (высокой жесткости) посвящен ряд работ, в которых вариационными методами с использованием полей скоростей перемещений, задаваемых по объему очага деформации, получены зависимости для определения параметров очага деформации, усилий на валках, моментов и др.

Однако в этих работах принимались многочисленные упрощения и допущения, например:

- боковые элементы профилей считались идеальными пластинами;

- не учитывалась реальная конфигурация очага деформации перед осевой плоскостью валков и т.п.; вследствие чего, расчеты по полученным зависимостям не обеспечивали необходимой точности результатов.

Методика проведения исследований. Для более точного решения целесообразно применение метода конечных элементов [1-3], позволяющего учитывать все особенности геометрии заготовки и

калибра. Метод достаточно легко реализуется на ПК, что существенно повышает точность расчета и обеспечивает возможность его корректировки для получения качественно правильной картины деформированной сетки.

Основные результаты исследований. Для решения большинства задач при разработке технологии производства профилей высокой жесткости необходимо предварительно найти форму свободной поверхности перед осевой плоскостью валков при известных условиях, заданных в координатах выделенной для рассмотрения области. При этом принимаются следующие допущения:

- после деформации сохраняется первоначальный объем каждого конечного элемента;
- узлы конечных элементов не разрываются;
- поверхность действительного очага деформации принимает форму, соответствующую минимуму суммарной работы деформации всех конечных элементов.

При нахождении работы деформации принята упруго-пластическая модель с упрочнением по

линейному закону. Используя алгоритм решения основной задачи, а также варьируя граничные условия в осевой плоскости валков и длину очага деформации, можно решать следующие задачи:

а) известны форма инструмента и усилие P формовки одного гофра. Требуется определить (без учета пружинения профиля) высоту Δh получаемого гофра из условия минимума полной потенциальной энергии

$$\sum_{k=1}^m A_{\text{деф}} k - P \cdot \Delta h \rightarrow \min, \quad (1)$$

где m - число конечных элементов

$A_{\text{деф}} k$ - расчетная работа деформации конечного элемента.

б) известны формы инструмента, жесткость клетки G , зазор между валками до начала формовки h_3 . Требуется определить Δh из условий минимума суммарной работы деформации металла клетки:

$$\sum_{k=1}^m A_{\text{деф}} k + \frac{1}{2} G (h_3 - h_{31})^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где h_{31} - зазор между валками под нагрузкой.

Если обозначить высоту элемента, формирующего гофр, через h , легко получить Δh (без учета пружинения) как разность между h и пружиной клетки ($h_3 - h_{31}$).

Для того, чтобы начать расчет координат узлов конечных элементов, необходимо задать произвольные координаты поверхности очага деформации. В настоящей работе они получены путем линейной интерполяции координат узлов конечных элементов в осевой плоскости валков и на входе в очаг деформации (считая, что здесь они те же, что и до деформации).

Алгоритм решения основной задачи (определения действительной формы очага деформации) состоит из 10 парных этапов. На каждом этапе рассчитываются координаты узлов деформированных конечных элементов:

- 1) из условия сохранения их объемов;
- 2) из условий минимума суммарной работы деформации.

Алгоритм для первой части каждого этапа заключается в последовательном (три инерции) уменьшении для каждого общего узла четырех смежных конечных элементов (имеющего номер l) величины

$$\Phi_{l1} = \sum_{k=1}^4 (V_{0kl} - V_{1kl})^2, \quad (3)$$

где V_{0kl}, V_{1kl} - расчетный объем конечного элемента до и после деформации, соответственно.

Поскольку объем тонкой оболочки (рассматриваемый очаг деформации) равен произведению площади ее поверхности на толщину листа, то условие (3) эквивалентно следующему функционалу:

$$\Phi_{l1} = \sum_{k=1}^4 (\mu_{kl} F_{0kl} - F_{1kl})^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

где F_{0kl}, F_{1kl} - площадь конечного элемента до и после деформации, соответственно;

μ_{kl} - отношения начальной и конечной толщин конечного элемента, определяемое его растяжением:

$$\mu_{kl} > 1.$$

Площадь четырехугольного конечного элемента рассчитывается как площадь двух треугольных элементов. Площадь треугольных конечных элементов в пространстве рассчитывали по формуле Герона

$$S = \sqrt{p(p-a_1)(p-a_2)(p-a_3)}, \quad (5)$$

где p - полупериметр;

a_1, a_2, a_3 - длины сторон треугольника, каждая из которых рассчитывается по формуле

$$a_k =$$

$$\sqrt{(x_{1k} - x_{2k})^2 + (y_{1k} - y_{2k})^2 + (z_{1k} - z_{2k})^2}. \quad (6)$$

Здесь x_{1k}, y_{1k}, z_{1k} - координаты одной из точек отрезка (с номером $1k$);

x_{2k}, y_{2k}, z_{2k} - координаты второй точки (с номером $2k$).

Значения координат, соответствующие минимуму (4), запоминаются в массиве координат вместо прежних и используются в расчете координат узлов следующих четырех смежных конечных элементов.

В алгоритме для второй части каждого этапа (одна инерция) также используется метод покоординатного спуска. При этом должно соблюдаться условие

$$\Phi_{2l} = \sum_{k=1}^4 A_{\text{деф}} k_l \rightarrow \min. \quad (7)$$

Поскольку при валковой формовке профилей высокой жесткости преобладает деформация вытяжки, величиной работы деформации изгиба пренебрегаем.

Работу деформации каждого конечного элемента рассчитывали по зависимости

$$A_{\text{деф}} k = \sigma_{ik} \varepsilon_{ik} F_{0k} s, \quad (8)$$

где σ_{ik} - интенсивность напряжений;

ε_{ik} - интенсивность деформации;

F_{0k} - площадь конечного элемента до деформации;

s - толщина полосы, из которой изготавливается профиль.

Интенсивность деформации рассчитывали по формуле

$$\varepsilon_{lk} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_{xk} - e_{yk})^2 + (e_{yk} - e_{zk})^2 + (e_{zk} - e_{xk})^2}. \quad (9)$$

Составляющие интенсивности деформации определяли по формулам

$$\begin{aligned} e_{xk} &= \frac{a_{0k} - a_{1k}}{a_{0k}}; \\ e_{yk} &= \frac{b_{0k} - b_{1k}}{b_{0k}}; \\ e_{zk} &= -e_{xk} - e_{yk}, \end{aligned} \quad (10)$$

где a_{0k}, a_{1k} - длина конечного элемента в направлении, перпендикулярном накоплению формовки, соответственно до и после деформации;

b_{0k}, b_{1k} - то же в направлении формовки.

Интенсивность напряжений рассчитывали по зависимости

$$\sigma_{ik} = \begin{cases} E_{\varepsilon k} & \text{при } E_{\varepsilon k} \leq \sigma_T \\ \sigma_T + \alpha(\varepsilon_k - \frac{\sigma_T}{E}) & \text{при } E_{\varepsilon k} > \sigma_T \end{cases} \quad (11)$$

где E - модуль упругости;

σ_T - предел текучести;

α - коэффициент упрочнения.

Усилие формообразования гофров определяли по зависимости

$$P = \frac{\sum_{k=1}^m A_{\text{деф } k}}{\Delta h} \quad (12)$$

Крутящий момент, необходимый для формообразования гофра определяли по зависимости

$$M = \frac{\sum_{k=1}^m A_{\text{деф } k}}{l_{\text{од}}} R, \quad (13)$$

где $l_{\text{од}}$ - длина очага деформации.

Особенностью данной работы является учет растяжения каждого конечного элемента посредством отношения $F_1/F_Q = \mu_k$, входящего в формулу (4), в соответствии с реальной геометрией очага деформации при формовке профилей высокой жесткости.

Рассмотрим форму очага деформации при установившемся процессе формовки периодических гофров (то есть при формовке их участков, имеющих постоянную высоту). Геометрию очага деформации наблюдали в заторможенных валках.

На участке заготовки между продольными осями двух соседних формируемых гофров перед осевой плоскостью валков можно выделить три характерные зоны (рис. 1). Зона I ограничена спереди осевой плоскостью валков, сзади - дугой некоторой кривизны, идущей от одного гофра к другому, с боков - основаниями гофров. В этой зоне металла сжат и полностью находится в плоскости формовки. Далее расположена зона II, в которой металл выпучивается от плоскости формовки до максимальной высоты (примерно равной высоте формируемого гофра), а затем выпучивание постепенно уменьшается до нуля. Гребни располагаются под углом примерно 45° к продольной оси гофров и доходят до середины плоского участка между ними. В зоне III весь металл находится в плоскости заготовки.

Осевая плоскость валков

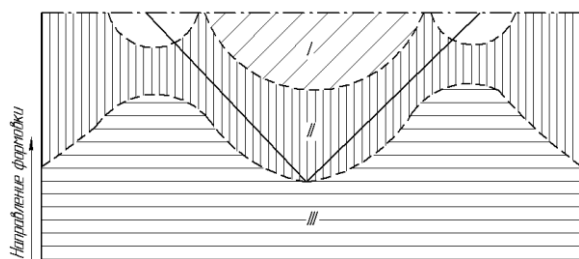


Рис. 1 - Характерные зоны очага деформации перед осевой плоскостью валков (вид сверху)

Если снять внешнюю нагрузку, подняв один из валков, почти вся зона выпучивается, изменяет форму. Четко выявляются небольшие пластические растянутые изогнутые (в плане) участки, примыкающие к гофрам под углом примерно 45° по отношению к их продольной оси. Внутри прямого

угла, образуемого двумя такими участками, примыкающими к одному и тому же гофру, полоса поднимается от плоскости формовки до максимальной высоты гофра.

Рассматривая участок, ограниченный продольной осью гофра и серединой плоского участка между двумя соседними гофрами (половина симметричного очага деформации), в первом приближении считаем, что расположенная под углом 45° к направлению формовки деформирования зона условно делит рассматриваемый очаг на два участка (рис. 2). На участке I между осевой плоскостью валков и названной зоной металл в основном растянут в поперечном направлении, на участке II преобладает растяжение в продольном направлении.

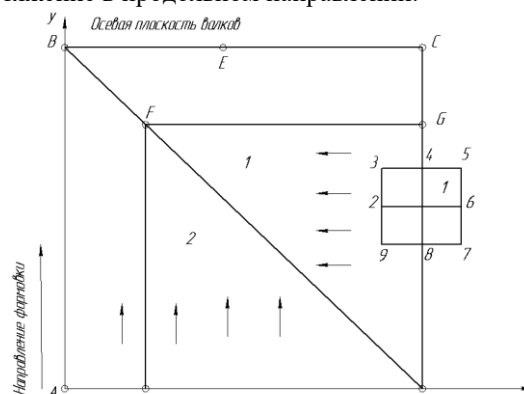


Рис. 2 - Расчетная схема растяжения очага деформации при формовке продольного гофра

На рис. 2 точка E - точка на контуре гофра, точка B соответствует наибольшей его высоте. Отрезок $AD=BC$ - половина шага между гофрами, $AB=CD$ - длина очага деформации, BE - половина ширины гофра. Точками 1, 2...9 обозначены номера узлов четырех смежных конечных элементов для пояснения условий симметрии, которые будут рассмотрены ниже.

Величину μ , характеризующую растяжение, определяли следующим образом.

Обозначим через h_B высоту гофра, через h_F - высоту очага деформации в произвольной точке F на диагонали BD . Величина h_F определяется путем линейной интерполяции:

$$h_F = h_B \frac{DF}{BD}. \quad (14)$$

Для зоны BCD

$$\mu_1 = \frac{FG}{l_x} = \sqrt{\frac{h_F^2 + l_x^2}{l_x^2}} \approx 1 + \frac{h_F^2}{2l_x^2}. \quad (15)$$

Для зоны ABD

$$\mu_2 = \frac{FH}{l_y} \approx 1 + \frac{h_F^2}{2l_y^2}. \quad (16)$$

Для конечных элементов, расположенных на диагонали BD

$$\mu_3 = \mu_1 \cdot \mu_2.$$

Были рассчитаны поверхности очага деформации для двух задач с различными граничными условиями на линиях AB и CD .

Граничные условия на линиях BC и AD для обеих задач принимали одни и те же. Отрезки оси X между линиями AB и EC разбивали на n равных частей. Координаты z на отрезке AD и EC принимали равными нулю, на отрезке BE - в соответствии с формой гофра.

Для первой задачи граничные условия на линиях AB и CD принимали следующим образом: отрезки оси между линиями BC и AD разбивали на равные части; координаты z на линии AB задавали по форме инструмента, на линии CD принимали равными нулю.

Для второй задачи на линиях AB и CD принимали условия симметрии. При расчете координат узлов конечных элементов, лежащих на линиях, принимали условия симметрии. При расчете координат узлов конечных элементов, лежащих на линиях AB и CD, координаты симметричных точек определяли по формулам:

$$\begin{aligned} x_3 - x_4 &= x_4 - x_5; x_2 - x_1 = x_1 - x_6; x_9 - x_1 \\ &= x_8 - x_7; \\ y_3 &= y_5; y_2 = y_6; y_9 = y_7; \\ z_3 &= z_5; z_2 = z_6; z_9 = z_7. \end{aligned} \quad (17)$$

Расчеты поверхности очага деформации для первой задачи, показали, что длина очага, соответствующая минимуму суммарной работы деформации, равна 110 мм при высоте гофра 36 мм (профиль боковой обшивки вагонеток «Корум Дружковский машиностроительный завод»). Получено хорошее совпадение объемов всех конечных элементов. Расхождения не превышали 5%.

На модели, построенной по результатам расчета (рис. 3), видна зона растяжения в поперечном направлении (см. рис. 2). Однако изгиб проекции линий в сторону слишком велик, следовательно, расчетная величина поперечного растяжения значительно завышена по сравнению с фактической величиной.

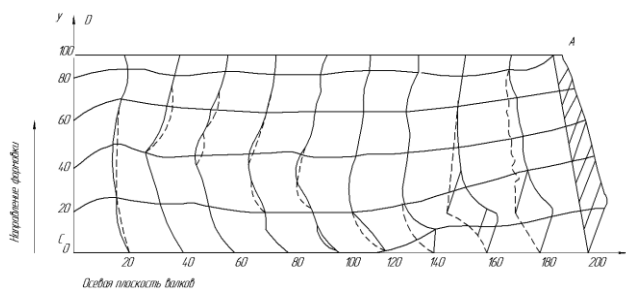


Рис. 3 - Расчетная форма очага деформации, полученная методом конечных элементов с использованием граничных условий для первой задачи

Расчеты для второй задачи дают меньшую на 40% (по сравнению с первой) длину очага деформации. Волна (выпучивание поверхности) расположена под углом 15° к линии. При экспериментальной формовке профиля этот угол значительно больше ($30-45^\circ$). Расчетная высота волны в два раза меньше максимальной высотой гофра. Фактическая высота волны в процессе формовки профиля равна максимальной высоте гофра.

Выводы.

1. Получены результаты, правильно отражающие качественную сторону процесса формовки продольных периодических гофров, вместе с тем, заданные граничные условия требуют дальнейшего уточнения.

2. Для отработки модели формообразования продольных периодических гофров и оценки ее достоверности необходимы экспериментальные исследования характера распределения поверхностных деформаций в очаге деформации.

Список літератури

1. Зенкевич О. Конечные элементы и аппроксимация. / О. Зенкевич, К. Морган. - Москва: Мир, 1986. - 318 с.
2. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / - Москва: Мир, 1979. - 392 с.
3. Тришевский, И.С. Теоретические основы процесса профилирования: монография / И.С. Тришевский, М.Е. Докторов. - Москва: Металлургия, 1980. - 287 с.

Bibliography (transliterated)

1. Zenkevich O., Morgan K. Konechnyye elementy i approksimatsiya. - Mosvow: Mir. 1986. - 318 p.
2. Segerlind L. Primeneniye metoda konechnykh elementov / - Mosvow: Mir. 1979. - 392 p.
3. Trishevskiy, I.S. Teoreticheskiye osnovy protsessa profilirovaniya: monografiya / I.S. Trishevskiy, M.E. Doktorov. - Mosvow: Metallurgiya. 1980. - 287 p.

Поступила (received) 13.10.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Разработка и исследование технологии производства профилей переменного сечения / Ю.А. Плесснецов, Е.Н. Христиненко, А.Н. Христиненко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №36(1258). – С. 62–66 – Библиогр.: 3 назви. – ISSN 2519-2671

Розробка та дослідження технології виробництва профілів змінного перетину / Ю.О. Плесснецов, Є.М. Христиненко, А.М. Христиненко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – №36(1258). – С. 62–66 – Библиогр.: 3 назви. – ISSN 2519-2671

Development and research of production technology of profiles of variable cross-section / Yu. A. Plesnetsov, E.N. Khristichenko, A.N. Khristichenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Innovative technologies and equipment of materials processing in engineering and metallurgy. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No 36(1258). – P. 62–66. – Bibl.:3. – ISSN 2519-2671

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Плесецов Юрій Олександрович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри обробки металів тиском, тел.: (097) 902-29-18; e-mail: plesnetsov@gmail.com.

Плеснецов Юрий Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», заведующий кафедрой обработки металлов давлением, тел.: (097) 902-29-18; e-mail: plesnetsov@gmail.com.

Plesnetsov Yury Alexandrovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Head of the department of metal forming, tel.: (097) 902-29-18; e-mail: plesnetsov@gmail.com.

Христиченко Єлизавета Миколаївна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри обробки металів тиском, тел.: (050) 969-72-14; e-mail: Lizax.2014@gmail.com.

Христиченко Елизавета Николаевна – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент кафедры обработки металлов давлением, тел.: (050) 969-72-14; e-mail: Lizax.2014@gmail.com.

Khristichenko Elizaveta Nikolaevna – National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», student of the department of metal forming, tel.: (050) 969-72-14; e-mail: Lizax.2014@gmail.com.

Христиченко Анастасія Миколаївна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри обробки металів тиском, тел.: (097) 026-17-38; e-mail: Anast733@mail.ru.

Христиченко Анастасия Николаевна – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент кафедры обработки металлов давлением, тел.: (097) 026-17-38; e-mail: Anast733@mail.ru.

Khristichenko Anastasia Nikolaevna – National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», student of the department of metal forming, tel.: (097) 026-17-38; e-mail: Anast733@mail.ru.